

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra Elektroenergetiky**

**Akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů**

**Storage of electrical energy gained from renewable sources**

**2010**

**Bc. Ondřej Šústek**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne .....

.....

## **Abstrakt**

V této práci jsem řešil problém s rozvíjející se výrobou elektrické energie z obnovitelných zdrojů, která je nespolehlivá a narušuje chod sítě. Vhodný akumulční prvek bude akumulovat vyrobenou energii z obnovitelných zdrojů, kterou dodá do sítě v případě potřeby. Cílem je vybrat vhodný akumulční systém pomocí multikriteriální analýzy. Zvolil jsem dvě výpočetní metody, protože jsem chtěl poukázat jak může ovlivnit výpočet zvolená metoda výpočtu. Výsledky se nepatrně liší. Metody se liší jednak způsobem výpočtu, ale i zvolenou metodou porovnání vah jednotlivých kritérií. Jako nejlepší akumulční prvek vypočtený pomocí multikriteriální analýzy je Superkondenzátor, který se jeví jako nejobektivnější. Dále jsem řešil možnost kombinace více akumulčních prvků. Kdy jeden prvek zajistí okamžitou dodávku elektrické energie do sítě v případě potřeby a druhý zajistí dlouhodobou dodávku řádově hodin. Na akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů se v budoucnu bude brát čím dál tím větší zřetel. Nejenom lze využít akumulaci energie pro zajištění dodávky do sítě, ale využít energii pro výrobu vodíku a následnému použití vodíku jako paliva v automobilovém průmyslu.

## **Klíčová slova**

Akumulace; Obnovitelné zdroje energie; Olovené akumulátory; Multikriteriální analýza; Superkondenzátor; Vodíkový systém

## **Abstrakt**

In this work, I solved the problem with an emerging generation of electricity from renewable sources, which is irresponsible and undermines the operation of the electrical network. Suitable storage element will accumulate the energy produced from renewable sources, which adds to the network if necessary. The aim is to select a storage system using multicriteria analysis. I chose the two calculation methods, because I wanted to point out how it can affect the calculation method chosen calculation. Result is mildly different. Methods vary both the method of calculation, but also the chosen method of comparing weights of criteria. The best storage element calculated using multi-criteria analysis is supercapacitors, which appears as objective as possible. I also dealt with the possibility of combining multiple storage elements. When one element of an instant supply of electricity to the grid if necessary, and the second term will ensure delivery of the order of hours. On the accumulation of electrical energy from renewable sources in the future will take more and more attention. Not only can use energy storage to ensure the supply network, but enegii used for production of hydrogen and subsequent use of hydrogen as a fuel in the automotive industry.

## **Klíčová slova**

Accumulation; Renewable energy; Lead-acid batteries; Multicriteria analysis; Supercapacitors; Hydrogen system

## Použité symboly a zkratky

KOH	Hydroxid draselný
OZE	Obnovitelné zdroje energie
NAP	Národní plán
ČR	Česká Republika
EU	Evropská Unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
VTE	Větrná elektrárna
MVE	Malá vodní elektrárna
CdTe	Telurid kadmiový
GaAs	Galium arsenid
CO <sub>2</sub>	Kysličník uhličitý
SO <sub>2</sub>	Kysličník siřičitý
ZPF	Zemědělský původní fond
NiCd	Nikl kadmium
NiMh	Nikl metalhydrid
Pb	Olovo
Li-ion	Lithium iontový
Li-Pol	Lithium polymerový
Li-MnO	Lithium manganový
PbO <sub>2</sub>	Oxid olovičitý
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
f	Kritérium
V	Varianta
p	Průměr
r	Relativní ukazatel vzdálenosti
u	Užitek
VRB (Vanadium redox battery )	Vanad redoxový akumulátor
CAES (Compressed air energy system)	Systém stlačování vzduchu
AA-CAES (adiabatic- compressed air energy system)	Adiabatický systém stlačování vzduchu
SMES (superconducting magnetic energy system )	Supravodivý magnetický akumulátor energie
PCS (Power conditioning system)	Systém stavu energie
WSA ( Weighted Sum Approach)	Metoda váženého součtu
IPA (Ideal Points Analysis)	Metoda ideálních bodů
CDA ( Concordance Discordance Analysis)	Metoda shody a neshody
TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	Metoda odchylky od ideální varianty

## Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>1. Požadavky ČR vůči EU.....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1. Výsledky analýzy.....	- 2 -
<b>2. Obnovitelné zdroje energie.....</b>	<b>- 3 -</b>
2.1. Energie vody.....	- 3 -
2.2. Energie slunce.....	- 7 -
2.3. Energie větru.....	- 8 -
2.4. Energie biomasy .....	- 10 -
2.4.1. Bioplyn .....	- 11 -
<b>3. Alternativní posouzení jednotlivých systémů akumulace.....</b>	<b>- 12 -</b>
3.1. Elektrochemické akumulátory .....	- 12 -
3.1.1. Olověné akumulátory .....	- 12 -
3.1.2. Niklové akumulátory .....	- 14 -
3.1.3. Lithiové akumulátory .....	- 15 -
3.2. Vanad redoxový akumulátor ( VRB ).....	- 16 -
3.3. Setrvačnick .....	- 18 -
3.4. Systém stlačeného vzduchu CAES ( compressed air energy storage).....	- 19 -
3.5. Supravodivý magnetický akumulátor energie.....	- 20 -
3.6. Superkondenzátor .....	- 22 -
3.7. Vodíkový systém .....	- 25 -
3.7.1. Elektrolyzátor .....	- 25 -
3.7.2. Palivový článek .....	- 27 -
<b>4. Výběr kritérií a jejich váhy pro rozhodování vybraných alternativ .....</b>	<b>- 28 -</b>
4.1. Vybrané alternativy.....	- 28 -
4.2. Teorie multikritériální analýzy .....	- 29 -
4.3. Výběr kritérií.....	- 30 -
4.4. Určení vah kritérií .....	- 30 -
4.4.1. Metoda kvantitativního párového srovnání kritérií pro výpočetní metodu TOPSIS .....	- 31 -
4.4.2. Metoda párového srovnání kritérií pro výpočetní metodu WSA.....	- 33 -
<b>5. Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie získané z OZE .....</b>	<b>- 35 -</b>
5.1. Výběr optimální varianty pomocí multikritériální metody TOPSIS.....	- 36 -
5.2. Výběr optimální varianty pomocí multikritériální metody WSA .....	- 42 -
<b>6. Technicko - ekonomický rozbor vybrané varianty s možností kombinace OZE pro akumulaci.....</b>	<b>- 45 -</b>
<b>Závěr.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>- 48 -</b>

## Úvod

Spalováním fosilních paliv v klasických energetických blocích vede k tvorbě emisí skleníkového plynu CO<sub>2</sub>, jenž je nutným produktem oxidace uhlíku a vývinu dalších nebezpečných plynů. Nutnost snižování těchto emisí je zřejmá. Uhlé elektrárny dnes produkují cca 25 % všech emisí oxidu uhličitého a cca 40 % oxidů dusíku a síry. Přibližně 25 % veškerých skleníkových plynů pochází z provozu automobilů.

V dlouhodobé perspektivě je třeba se zajímat o vlastní zásoby fosilních zdrojů energie. Většina pramenů uvádí, že 90% spotřeby energie je v současnosti kryto spalováním fosilních paliv, jimiž jsou uhlí, plyn a ropné produkty. Při předpokladu spotřeby těchto energetických zdrojů na úrovni posledních let, jsou například zásoby zemního plynu a ropy na cca. 50 let. V případě uhlí je celosvětová předpokládaná zásoba na cca. 200 let.

Pro omezení tvorby skleníkového plynu se rozvíjí alternativní výroba elektrické energie z OZE (obnovitelné zdroje energie). Dalším hlavním důvodem rozvoje OZE byl vstup ČR do Evropské Unie, která klade požadavky na ČR splnitelné do roku 2020.

## 1. Požadavky ČR vůči EU

Byly analyzovány 3 hlavní scénáře různého rozdělení výroby elektřiny mezi jednotlivé typy OZE.

- **Scénář dle NAP 2010** – scénář rozvoje dle předpokladů (předpokládá splnění závazků vůči EU v roce 2020).
- **Scénář investorský** – respektuje zájem investorů dle aktuálního trendu, pouze však do splnění podmínek směrnice EU (tzn. 9,5 tWh v roce 2020 z OZE).
- **Scénář žádostí** – uvažuje realizaci všech „živých“ žádostí o připojení zdrojů podaných u provozovatelů sítí k 30.11.2009 (tzn. všechny schválené žádosti a žádosti ve schvalovacím procesu u provozovatelů sítí ČR). Scénář předpokládá splnění závazků vůči EU v roce 2020. [22]

### 1.1. Výsledky analýzy

- Po vyhodnocení aktuálních žádostí investorů o připojení nových OZE do sítí podaných k 30. 11. 2009 vyplývá, že ke splnění závazků ČR vůči EU stačí realizovat přibližně 38 % ze všech podaných žádostí (tj. 38 % z 12 971 MW OZE), což reflektuje scénář investorský.
- Předpokládaný rozvoj OZE přitom nejvíce převyšují požadavky na připojení FVE (fotovoltaické elektrárny) a VTE (větrné elektrárny).

Scénář žádostí vůči ostatním sledovaným scénářům (NAP a investorský).

- VTE: **3 655 MW** vůči předpokladu **385 MW** v roce 2012 a **800 MW** v roce 2020 (NAP)
- FVE: **8 547 MW** vůči předpokladu **1 883 MW** v roce 2012 a **2 900 MW** v roce 2020 (NAP)
- VTE: **3 655 MW** vůči předpokladu **550 MW** v roce 2012 a **800 MW** v roce 2020 (INV)
- FVE: **8 547 MW** vůči předpokladu **2 600 MW** v roce 2012 a **2 900 MW** v roce 2020 (INV)

Naproti tomu požadavky v instalaci nových zdrojů v oblasti biomasy – 374 MW žádostí – nedosahují předpokládaného rozvoje s ohledem na prognózu využitelného množství biomasy ve sledovaném období (nárůst produkce biomasy o 535 až 550 tis. tun) a další rezervy ve využití biomasy pro tuzemskou výrobu elektřiny a zejména tepla. V současnosti se exportuje zhruba 600 tis. tun biomasy.

V oblasti VTE a FVE jsou překročeny požadavky na připojení do sítě a nutno s tím něco udělat. Nyní nastává otázka co s vyrobenou energií, kdy výkon je časově proměnlivý? Energie narušuje správný chod sítě a je nespolehlivá. Je nutné uvažovat o akumulaci elektrické energie. U VTE a FVE je nutno akumulovat elektrickou energii. U Biomasy lze regulovat výkon a čas. Proto není nutné vyrobenou energii akumulovat, ale reagovat na požadavky odběratele a tím se vyhnout ztrátám při akumulaci energie. [22]

Díky akumulaci elektrické energie vyrobené z FTV a VTE, lze vyplnit „špičky“ v distribuční síti a nebo může být energie využita jako rezervní výkon. Dostaneme ihned z nespolehlivého zdroje energie zdroj spolehlivý a zároveň finančně výhodný. Nutno však vzít v potaz jaký druh akumulace energie z FTV a VTE bude nejvýhodnější.

## **2. Obnovitelné zdroje energie**

Základními, ekologicky čistými obnovitelnými zdroji elektrické energie jsou vodní elektrárny všeho druhu, spalování biomasy, sluneční fotovoltaické elektrárny a větrné elektrárny. Tyto zdroje elektrické energie je možné použít pouze v případě vhodných geografických a klimatických podmínek. Vyjma vodních elektráren (mimo přečerpávací a akumulární vodní elektrárny), pracuje každý ze zmíněných zdrojů elektrické energie přerušovaně. Navzdory výraznému meziročnímu nárůstu množství těchto zdrojů je množství elektrické energie poskytované těmito zdroji velmi malé vzhledem k současným nárokům společnosti, aby pracovali jako primární zdroje energie.

### **2.1. Energie vody**

#### **Rozdělení vodních elektráren**

- Vodní elektrárny
- Malé vodní elektrárny



MVE ( malá vodní elektrárna ) je označení pro vodní elektrárny s instalovaným výkonem maximálně do 10MW včetně. Evropská unie však považuje za MVE vodní elektrárny do výkonu 5MW. Velká většina výkonu vodních elektráren, cca 90 % je z elektráren o výkonu větším než 5 MW a zbylých cca 10 % je z MVE podle evropského řazení.

MVE se dělí podle :

- výkonu
  - průmyslové (od 1 MW)
  - minielektrárny (do 1 MW)
  - mikrozdroje (do 0,1 MW)
  - domácí (do 35 kW)
- spádu
  - nízkotlaké (do 20 m)
  - středotlaké (20 - 100 m)
  - vysokotlaké (od 100 m)
- nakládání s vodou
  - průtokové
  - akumulční
  - přečerpávací
  - přílivové ( v ČR nepoužito)

Posláním vodních elektráren je, zejména v naší zemi, kde není dostatek velkých vodních zdrojů, pracovat jako doplňkové elektrárny k velkým energetickým kolosům, kterými jsou tepelné nebo jaderné elektrárny. Doplnují a vyrovnávají okamžitou energetickou bilanci v elektrizační síti. Velké energetické zdroje, jako jsou tepelné elektrárny, nejsou schopné a ani uzpůsobené rychle a pružně reagovat na stále se měnící spotřebu. Vznikají tak ztráty z přebytku vyrobené energie. [7]

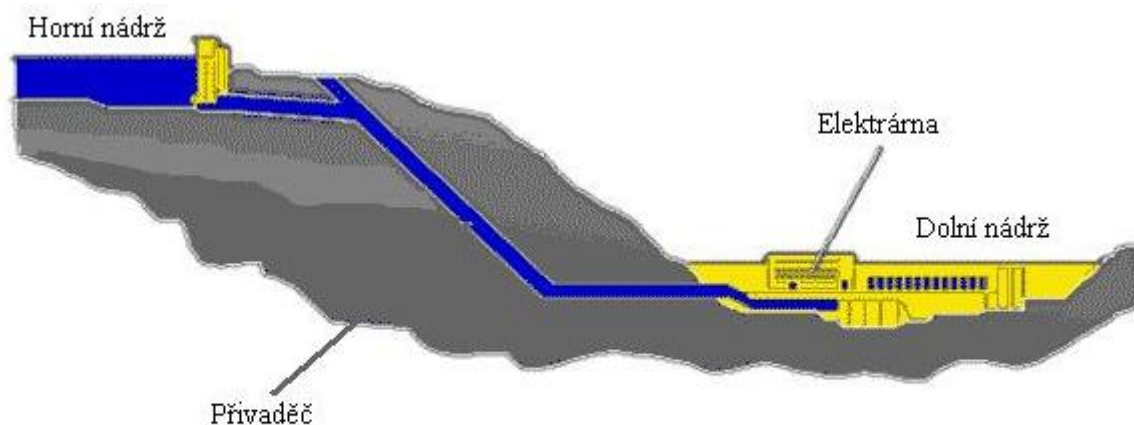
Používání přečerpávacích vodních elektráren je vedeno nutností zamezit těmto energetickým ztrátám. Tento typ vodních elektráren umí "skladovat" draze vyrobenou energii. Proces uchování nevyužitě energie, vyrobené převážně v noci a o sobotách a nedělích, probíhá tak, že elektrická energie je v nich měněna na energii jinou. Takovou energii, která je trvale v pohotovosti a v každém okamžiku je použitelná pro vykrývání energetických špiček a maximálních spotřeb.

V době přebytku elektrické energie (většinou v noci) je voda z dolní nádrže čerpána do nádrže horní, čímž voda získává potenciální energii. V době potřeby je pak možno kdykoli tuto uskladněnou energii znovu použít. Voda z horní nádrže se přivede potrubím na turbínu. Turbína pohání generátor a mění uloženou energii ve vodě zpět na elektrickou energii. [13]

V praxi se tento proces děje tak, že vodní přečerpávací elektrárny se staví v horském terénu, aby bylo možno získat dostatečný výškový rozdíl mezi oběma nádržemi. Nádrže jsou spojeny tlakovým potrubím s turbínou a generátorem na druhém konci.

Turbína je konstruována tak, aby byla schopna pracovat ve dvou režimech. Jednou, při přečerpávání, jako čerpadlo, podruhé, při zužitkování horní vody, jako vodní motor. Příkladem přečerpávací vodní elektrárny je elektrárna Dlouhé stráně na Mravenečniku v Jeseníkách. Výškový rozdíl hladin obou nádrží je 535 m. Koruna horní hráze leží ve výšce 1 350 m n.m. Elektrárna je osazena dvěma reverzními Francisovými turbínami s instalovaným výkonem 325 MW.

Velkou předností přečerpávacích vodních elektráren je ta skutečnost, že kromě "skladovacích" schopností jsou schopny se po spuštění přifázovat do elektrizační sítě s plným výkonem v několika minutách.



Obr. 2.1. Schéma přečerpávací elektrárny [14]

Tab. 2.1. Přehled vodních elektráren provozovaných Skupinou ČEZ

<b>Akumulační a průtočné vodní elektrárny</b>	<b>Instalovaný výkon [MW]</b>	<b>Rok uvedení do provozu</b>
Lipno I	120	1959
Orlík	364	1961 - 1962
Kamýk	40	1961
Slapy	144	1954 - 1955
Štěchovice I	22,5	1943 - 1944
Vrané	13,88	1936
Střekov	19,5	1936

<b>Malé vodní elektrárny</b>	<b>Instalovaný výkon [MW]</b>	<b>Rok uvedení do provozu</b>
Lipno II	1,5	1957
Hněvkovice	9,6	1992
Kořensko I	3,8	1992
Kořensko II	0,98	2000
Želina	0,64	1994
Mohelno	1,2; 0,56	1997; 1999
Dlouhé Stráně II	0,16	1996
Přelouč	2,34	1927
Spálov	2,4	1926
Hradec Králové I	0,75	1926
Prácheň	9,75	1953
Pastviny	3	1938
Obříství	3,36	1995
LesKrálovství	2,12	1923
Předměřice nad Labem	2,1	1953
Pardubice	1,96	1978
Spytihněv	2,6	1951
Brno Kníničky	3,1	1941
Brno Komín	0,21	1923

<b>Malé vodní elektrárny</b>	<b>Instalovaný výkon [MW]</b>	<b>Rok uvedení do provozu</b>
Veselí nad Moravou	0,27	1914, 1927
Vydra (ZČE)	6,4	1939
Hracholusky	2,55	1964
Čeňkova Pila	0,1	1912
Černé jezero I	1,5	1930
Černé jezero II	0,04	2004
Černé jezero III	0,37	2005
Bukovec	0,63	2007

<b>Přečerpávací vodní elektrárny</b>	<b>Instalovaný výkon [MW]</b>	<b>Rok uvedení do provozu</b>
Štěchovice II	45	1948, 1996
Dalešice	450	1978
Dlouhé Stráně I	650	1996

[7]

Vodní elektrárny nemají časově proměnlivý výkon, proto není nutno akumulovat vyrobenou elektrickou energii.

## ***2.2. Energie slunce***

### **Princip fungování fotovoltaiky**

Principem je přeměna dopadajícího slunečního záření v elektrickou energii. K tomu dochází v fotovoltaických článcích, které dělíme na tyto základní druhy.

- Amorfni
- Polykrystalické
- Monokrystalické

Další typy článků — běžně nepoužívané

- Z teluridu kadmnatého (CdTe)
- Z galiumarsenidu (GaAs)
- Vícepřechodové struktury
- Organické fotovoltaické

### **Amorfní články**

Základem je napařovaná křemíková vrstva. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 4 až 8%. Tyto typy článků jsou nejlevnější a jsou využívány v místech, kde není omezení prostorem.

### **Polykrystalické články**

Základem je křemíková podložka. Články se skládají z většího počtu menších polykrystalů. Účinnost se pohybuje v rozmezí 10 až 14%. Jejich výroba je levnější a rychlejší než monokrystalických.

### **Monokrystalické články**

Základem je podobně jako u polykrystalických článků křemíková podložka. Krystaly jsou větší než 10 cm a vyrábí se tažením roztaveného křemíku ve formě tyčí o průměru až 300 mm. Ty se poté rozřežou na tenké plátky (podložky). Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 13 až 17%. [3]

### **Ekologický přínos FVE ( fotovoltaických elektráren)**

- Ekologický projekt, šetrný k životnímu prostředí, neprodukuje žádné škodliviny ani žádný hluk.
- Nejčistší forma výroby elektrické energie, palivo je ze slunce zcela zdarma.
- Dlouhá životnost a vysoká spolehlivost solárních článků, 100% recyklovatelnost technologie.[13]

## **2.3. Energie větru**

Energie větru patří k historicky nejstarším využívaným zdrojům energie. Vítr vzniká v atmosféře na základě rozdílu atmosférických tlaků jako důsledku nerovnoměrného ohřívání zemského povrchu.

Teplý vzduch stoupá vzhůru, na jeho místo se tlačí vzduch studený. Zemská rotace způsobuje stáčení větrných proudů, jejich další ovlivnění způsobují morfologie krajiny, rostlinný poryv, vodní plochy.

Větrné elektrárny se vyrábějí ve velkém rozsahu výkonů a používají se pro nejrůznější účely. Větrná energetika je označení pro oblast technologie zabývající se využitím větru jako zdroje energie. Nejobvyklejším využitím jsou dnes větrné elektrárny, které využívají síly větru k roztočení vrtule (větrná turbína). K ní je pak připojen elektrický generátor. Získaná energie je přímo úměrná třetí mocnině rychlosti proudící vzdušné masy, proto větrné elektrárny po většinu doby nedosahují nominálních hodnot generovaného výkonu.

Větrná energetika je obnovitelným zdrojem energie, ale může být použita pouze tam, kde má vítr průměrnou roční rychlost alespoň 4 m/s ve výšce 10 m nad zemí. Jde použít i při menších rychlostech, ale to se z hlediska ekonomického spíše vyplatí jiný zdroj energie. Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na stožáru energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie (na podobném principu turbogenerátoru pracuje jak klasická, vodní či jaderná elektrárna). Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly, listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídel letadla.

Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztahové síly s druhou mocninou rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny. Obsluha větrné elektrárny je automatická. Životnost nové větrné elektrárny se udává 20 let od uvedení do provozu.

Využitelný potenciál energie větru velmi ovlivňuje typ navržené větrné elektrárny a její výkon. Větrné elektrárny se od sebe liší výtěžností pro určité parametry větru, což vyplývá z konstrukce vrtule/rotoru, typu generátoru a regulace. [16]



Obr. 2.2. Větrná elektrárna [16]

### **Přínosy větrných elektráren (VTE)**

- Jedná se o čistě obnovitelný zdroj energie s nulovou produkcí CO<sub>2</sub> (nevyužívá spalovací proces), neohrožující exhaláty zdraví obyvatelstva, neboť má nulovou produkci SO<sub>2</sub>, prachu a popílku, pro jeho provoz není potřebná voda a odkalovací nádrž, neprodukuje jaderný odpad.
- Jediná moderní VTE o jmenovitém výkonu 2 MW ročně vyrobí v průměru 4 430 MWh elektřiny, což představuje roční spotřebu 1265 domácností, tj. asi 3200 osob.
- VTE disponují krátkou návratností energie využitě při jejich výrobě a instalaci (dle výrobců 3 – 6 měsíců).
- VTE využívají domácí energetické zdroje, čímž přispívají k nižší energetické závislosti na zahraničí a zvyšují tak energetickou bezpečnost naší země.
- VTE mají minimální nároky na zábor ZPF (zemědělského půdního fondu) v poměru na MW instalovaného výkonu.
- Moderní stroje při správném projektování splňují veškeré hygienické limity.
- V podmínkách ČR se jedná o decentralizovaný zdroj, naše distribuční soustava umožňuje připojování projektů o průměrné velikosti 4 – 8 MW, často méně. Rozptýlenost zdrojů nedává možnost diverznímu ničení a tedy nevyžaduje nákladnou ochranu a ostrahu.
- V podmínkách ČR se jedná o druh OZE s nejnižší výkupní cenou, jejíž hodnota je nejbližší k ceně elektřiny silové. VTE tedy mají nejnižší nároky na podporu výkupní ceny jimi vyrobené elektřiny.
- V podmínkách ČR se jedná o zdroj s aktuálně největším potenciálem k výraznému zvýšení podílu vyrobené energie z OZE ve vztahu k požadavkům EU. [16]

### **2.4. Energie biomasy**

Biomasa je definována jako hmota organického původu. V souvislosti s energetikou jde nejčastěji o dřevo a dřevní odpad, slámu a jiné zemědělské zbytky včetně exkrementů užitkových zvířat.

Rozlišujeme biomasu "suchou" (např. dřevo) a "mokrou" (např. tzv. kejda - tekuté a pevné výkaly hospodářských zvířat promísené s vodou). Základní technologie zpracování se dělí na suché procesy (thermochemická přeměna) jako je spalování, zplyňování a pyrolýza a procesy mokré

(biochemická přeměna), které zahrnují anaerobní vyhnívání (metanové kvašení), lihové kvašení a výrobu biovodíku. Zvláštní podskupinu potom tvoří lisování olejů a jejich následná úprava, což je v podstatě mechanicko-chemická přeměna (např. výroba bionafty a přírodních maziv).

Biomasa (nejčastěji ve formě dřevní štěpky) se ve velkém spaluje v klasických elektrárnách ve fluidních kotlích s cirkulací spalin spolu s energetickým uhlím. Pro průmyslové aplikace nebo systémy centrálního zásobování teplem se používají kotle nad 100 kW spalující také dřevní štěpku nebo balíky slámy. Často jsou vybaveny automatickým přikládáním paliva a dokáží spalovat i méně kvalitní a vlhčí biomasu. Někdy tato zařízení využívají kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (kogenerace). [6]

### **2.4.1. Bioplyn**

Při rozkladu organických látek (hnůj, zelené rostliny, kal z čističek) v uzavřených nádržích bez přístupu kyslíku vzniká bioplyn. Ze zemědělských odpadů se v největší míře energeticky využívá kejda, případně i slamnatý hnůj, sláma, zbytky travin, stonky kukuřice, bramborová nat' a další. Tímto způsobem je možné zpracovávat také slámu, piliny a jiný odpad, proces je však pomalejší.

V bioplynovém zařízení se biomasa zahřívá na provozní teplotu ve vzduchotěsném reaktoru. Obvyklá teplota je pro mezofilní bakterie 37 až 43 °C, pro termofilní 50 až 60 °C. Princip vyvíjení bioplynu je velmi jednoduchý, protože je však nutné dodržovat bezpečnostní normy, zařízení se stávají složitými a tudíž dražšími.

### **Fermentace biomasy**

Fermentací roztoků cukrů je možné vyprodukovat ethanol (ethylalkohol). Vhodnými materiály jsou cukrová řepa, obilí, kukuřice, ovoce nebo brambory. Cukry mohou být vyrobeny i ze zeleniny nebo celulózy. Teoreticky lze z 1 kg cukru získat 0,65 l čistého ethanolu, který je vysoce hodnotným kapalným palivem pro spalovací motory. Jeho přednostmi jsou ekologická čistota a antidetonační vlastnosti, nedostatkem je schopnost vázat vodu a působit korozi motoru.

V USA probíhají výzkumy výroby ethanolu z celulózy pomocí speciálně vyšlechtěných mikroorganismů. Ethanol lze pak získat ze dřeva nebo trávy. [5]

Jelikož doba výroby energie je závislá pouze na nás, nevidím zde důvod k akumulaci.



### 3. Alternativní posouzení jednotlivých systémů akumulace

#### 3.1. Elektrochemické akumulátory

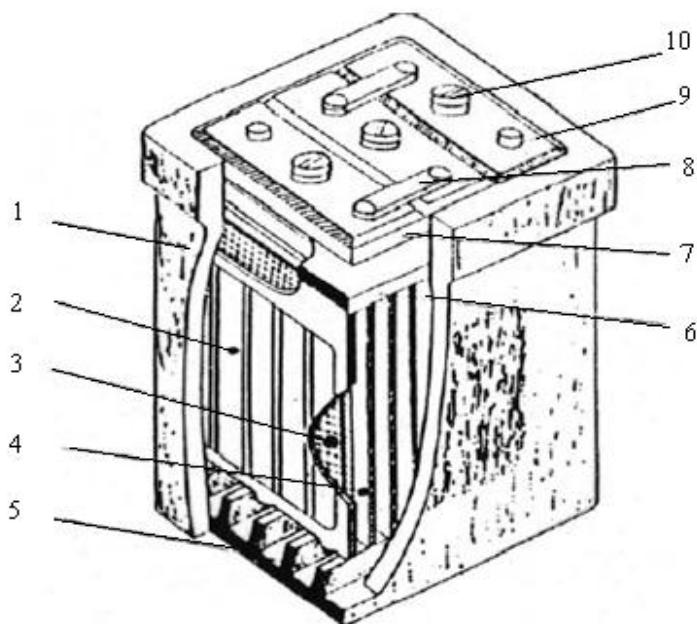
Pro akumulaci elektrické energie se využívá chemické reakce.

##### Rozdělení elektrochemických akumulátorů

- **Olověné (Pb)**
- **Niklové**
  - Nikl kadmiový (NiCd)
  - Nikl Metalhydridový (NiMh)
- **Lithiové**
  - Lithium iontový (Li-ion)
  - Lithium polymerový (Li-Pol)
  - Lithium manganový (Li-MnO) [9]

##### 3.1.1. Olověné akumulátory

Olověný akumulátor je galvanický článek s elektrodami na bázi olova, jehož elektrolytem je kyselina sírová. Olověné akumulátory jsou jedním z nejpoužívanějších elektrochemických zdrojů energie. Vyrábějí se v kapacitách řádově od 1 do 10 000 Ah. Hlavními výhodami je dobře zvládnutá technologie výroby, relativně nízká cena a vysoký výkon – např. pro startování automobilu by se jiné články než olověné použít prakticky nedaly.[4]



Obr. 3.1. Řez olověným akumulátorem [9]

- 1 – nádoba
- 2 – záporná elektroda
- 3 – separátor
- 4 – kladná elektroda
- 5 – opěrné hranoly
- 6 – můstek
- 7- víko
- 8 – mezičlánkový spoj
- 9 – proudový vývod
- 10 – ventilační zátka

Samy se vybíjí, v prvních dnech dochází k úbytku dokonce o 2-3%. Elektrolytem v olověných akumulátorech je vodou zředěná kyselina sírová buď ve formě roztoku nebo ztužená do formy gelu. Aktivní hmotu záporné elektrody tvoří houbovitě olovo, u kladné elektrody je to oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ).

- Rovnice vybíjení  $\text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{PbSO}_4$
- Rovnice nabíjení probíhá opačně než rovnice vybíjení.

Speciální baterie navržené pro hluboké vybití mnohem méně podléhají opotřebení elektrod při vybíjení a nabíjení a používají se tam, kde se baterie pravidelně vybíjejí a nabíjejí – fotovoltaické systémy, golfové vozítka, elektrické automobily atd. Tyto baterie mají tlusté elektrody, které dodávají sice menší proud, ale vydrží časté nabíjení. [8]

### **3.1.2. Niklové akumulátory**

Obecně mají větší hmotnost, mohou se nabíjet rychle a mohou dodávat trvale velký proud.

#### **Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)**

Nikl-kadmiové baterie (Ni-Cd) využívají nikl (Ni) a toxické kadmium (Cd). Jelikož jsou k dostání v mnoha velikostech, používají se jako náhrada za alkalické baterie. Pokud jsou Ni-Cd baterie znovu nabity dříve než jsou úplně vybité, objeví se u nich tak zvaný "paměťový efekt". Baterie si pamatují, ve kterém stádiu byly znovu nabité při předešlém použití a i při následném užití dochází v tomto stádiu k náhlému poklesu napětí. Měly by se jednou za čas úplně vybit, neměly by se nechat přehřívat. Pro životní prostředí jsou velmi zatěžující, recyklace je velmi nákladná. Kapacita je 1,2 V.[9]

#### **Nikl-metalhydridové akumulátory (NiMH)**

Jsou obdobou nikl-kadmiových akumulátorů. Byly vyvíjeny na základě požadavků na vyšší kapacitu akumulátoru při stejném objemu a s ohledem na zátěž životního prostředí. Nejvíce došlo k uplatnění tohoto typu akumulátorů u mobilní komunikace - mobilní telefony a přenosné počítače. Náhradou Cd za směs jiných kovů došlo ke změně vlastností. Jejich kapacita je oproti klasickým NiCd akumulátorům vyšší cca o 40% při stejné velikosti. Použitelnost v mezních klimatických podmínkách je horší - zaručená funkce je do max -10°C. Skladování těchto akumulátorů je možné v nabitém i vybitém stavu. Je ale nutné minimálně 3x v průběhu jednoho roku články několikrát nabít a vybit, jinak vlivem chemických reakcí dojde k znehodnocení elektrod akumulátoru a tudíž nevratné ztrátě kapacity. Kapacita je 1,2 V, stejně jako u NiCd. Samovybívají se a objevuje se zde také paměťový efekt.

#### **Složení**

kladná elektroda – nikl, záporná elektroda - hydrid směsi kovů (každý výrobce si své složení chrání), elektrolyt - draselný louh [9]

### 3.1.3. Lithiové akumulátory

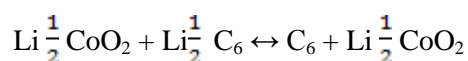
Li-ion je druh nabíjecí baterie běžně používané ve spotřebitelské elektronice. Kvůli vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejvíce používaný typ. Napětí jednoho článku je 3,6 V a nabíjí se na 4,2 V.

#### Lithium-Iontové akumulátory (Li-Ion)

Li-ion je druh nabíjecí baterie běžně používané ve spotřebitelské elektronice. Kvůli vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejvíce používaný typ. Napětí jednoho článku je 3,6 V a nabíjí se na 4,2 V.

První experimenty činil G. N. Lewis, už v roce 1912. Poté byla vyvíjena hlavně v Bellových laboratořích. První prodejní verzi vyrobila firma Sony v roce 1991. Anoda je vyrobená z uhlíku, katoda je kovový oxid, elektrolyt je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. [9]

- Zjednodušená základní chemická reakce



#### Výhody

- Může být vyrobena v různých tvarech.
- Velmi vysoká hustota energie (→ relativně vysoká kapacita a malý objem/hmotnost)
- Téměř žádné samovybíjení (do 5%).
- Nemá paměťový efekt.
- Není ji třeba formátovat - několikrát nabíjet a vybíjet před prvním použitím.
- Životnost 500-2000 nabíjecích cyklů.
- Tepelná pojistka.

### Nevýhody

- Baterie stárne/ztrácí maximální kapacitu nehledě na to, jestli je nebo není používána (již od výroby). Rychlost tohoto stárnutí se zvyšuje s vyšší teplotou, vyšším stavem nabití, a vyšším vybíjecím proudem/zatížením.
- Nebezpečí výbuchu nebo vznícení.
- Vadí jí úplné vybití (časem se vybije i sama), je těžké jí znovu "obživit".
- Nesmí se nechat přebít.
- Nabíjí se pomaleji než li-pol.
- Neměly by se nechat ve velkém horku nebo mraze, ani zbytečně úplně vybit.

### Lithium-polymerové akumulátory (Li-Pol)

Nabíjí se na 4,2 V, napětí jednoho článku dosahuje 3,7 V. Velkými výhodami je velmi nízká hmotnost, vysoká kapacita. Jsou však náchylné k mechanickému poškození - při proražení obalu a vniknutí vzduchu do článku dojde k jejich zničení. Elektrolyt není hořlavý → menší nebezpečí při nešetrném zacházení. Samy se nevybíjí. Mohou se velmi rychle nabíjet.

### Lithium-manganové akumulátory (Li-MnO)

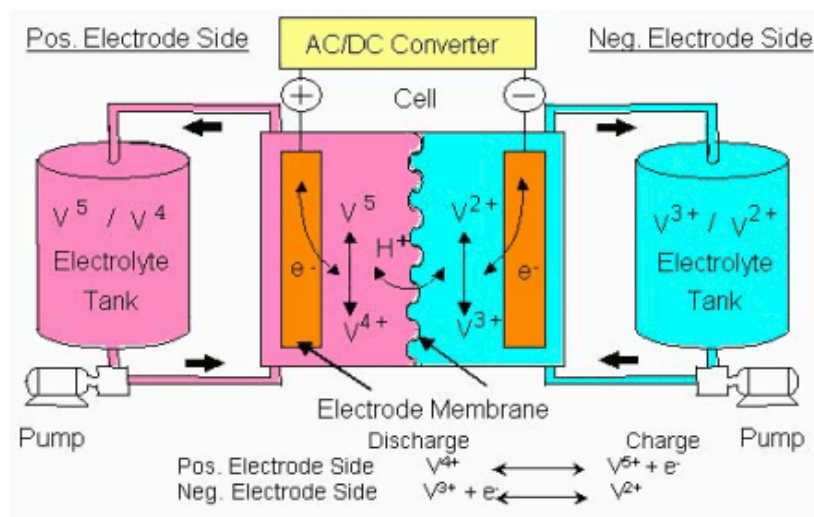
Baterie je zapouzdřena v kovovém obalu, který chrání článek před mechanickým poškozením. Články mají tepelnou pojistku, která při přehřátí článku přeruší odběr proudu. Hmotnost sice není tak nízká jako u Li-Pol, ale Li-MnO zase slibují bezpečný provoz a dlouhou životnost. Velmi rychle se nabíjí. [9]

## 3.2. Vanad redoxový akumulátor ( VRB )

Jedná se o elektrochemický systém uchování elektrické energie a patří mezi palivové články. VRB obsahuje 2 různé elektrolyty, kde každý elektrolyt je uložen v samostatné nádrži. Jeden je palivo a druhý oxidant. Elektrolyty jsou pomocí čerpadel čerpány do palivového článku.

Využívá se schopnosti vanadu vyskytovat se ve více valenčních uspořádáních od  $V^2$  do  $V^4$ . Elektrolyty cirkulují ve dvou okruzích oddělených ve vlastním článku iontoměnnou (PEM) membránou. V článku jedna forma elektrolytu elektrochemicky oxiduje a druhá redukuje působením elektrického proudu přiváděného nebo odváděného elektrodami do vnějšího elektrického obvodu.

Přechod z režimu nabíjení na vybíjení probíhá prakticky okamžitě (v časech řádu ms) v závislosti na polaritě rozdílu okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu. [2]



Obr. 3.2. VRB akumulátor

- Výkon řádově 100MW
- Kapacitu nám udává velikost nádrží elektrolytu.
- Vysoká energetická účinnost mezi 80 a 90% ve velkých zařízeních.
- Může dojít k úplnému vybití, aniž by došlo k poškození systému.
- Může být jak elektricky, tak i mechanicky dobíjena.
- VRB může být dobíjena a vybíjena až 10000 cykly bez výměny elektrolytu.
- V tomtéž elektrochemickém měniči může probíhat jak nabíjení, tak vybíjení. Podobně jako u klasických typů akumulátorů. [2]

### 3.3. Setrvačník

#### Popis setrvačníku

Setrvačníky jsou používány u některých konvenčních motorgenerátorů pro uchování mechanické energie požadované při spuštění spalovacího motoru v případě poruchy napájení. V tomto případě pouze okolo 5% energie setrvačníku může být využito pro výrobu elektrické energie přímo, protože změna rychlosti, a tím i frekvence, je příliš velká.

Když je setrvačník použit jako zdroj energie, jeho koncepce je zcela odlišná. Setrvačník je "nabíjen" udržováním rotující rychlosti - hlavním pohonem. Když se hlavní zdroj porouchá, je energie ze setrvačníku použita pro generování elektrické energie na proměnné frekvenci a napětí, které je převedeno na standardní frekvenci a napětí elektronickým invertorem. Protože je uchovaná energie proporcionální k druhé mocnině rotační rychlosti, může být použito okolo 50% rozsahu otáček. [4]



Obr. 3.3. Setrvačnickem [4]

Konstrukce setrvačnicku jsou charakterizovány jako vysokorychlostní nebo nízkorychlostní. Vysokorychlostní setrvačnicku jsou konstruovány ze skleněných nebo uhlíkových vláken, které jsou přibližně 5x lehčí než ocel.

Kvůli tepelnému namáhání a velkým odstředivým silám je v soustrojí rotor generátoru trvalý magnet. Soustrojí setrvačnicku/rotor rotuje ve vakuu, je vybaveno magnetickými ložisky tak, aby se vyhnuli mechanickým třecím silám. Vysokorychlostní setrvačnicku jsou v provozu v rozsahu rotačních rychlostí od 10 000 až do 100 000 otáček za minutu. V současné době se vyrábí s výkony až do 250 kW.

Nízkorychlostní setrvačnicku jsou v provozu v rozsahu až do 6 000 otáček za minutu. Kvůli nižší rotační rychlosti ve srovnání s vysokorychlostními setrvačnicku je v těchto konstrukcích zapotřebí podstatně většího momentu setrvačnosti, výsledkem jsou vyšší hmotnosti. Setrvačnicku je vyroben z oceli, a není nezbytná činnost ve vakuu, nýbrž v částečném vakuu nebo může být použit plyn nízké hustoty, aby se snížily třecí ztráty. Motorgenerátor je synchronní stroj s budícím vinutím na rotoru.

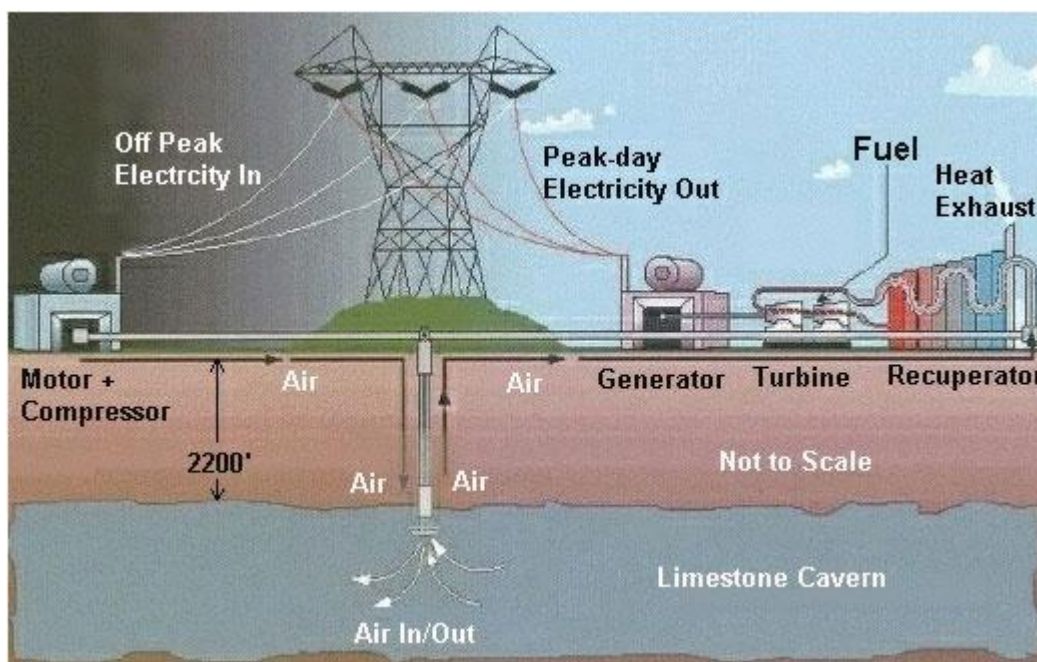
Tato vinutí vytvářejí ztráty a teplo, ale výhodou oproti vysokorychlostnímu generátoru setrvačnicku je možnost regulace buzení. Systémy nízkorychlostního setrvačnicku mohou být vyrobeny o jmenovitých výkonech až do 2 MVA a jsou schopny dodávat energii po dobu 1- 30 sekund. Nízkorychlostní setrvačnicku jsou často používány jako kombinované systémy s tradičními generátory. [4]

### ***3.4. Systém stlačeného vzduchu CAES ( compressed air energy storage)***

#### **Princip funkce**

Přečerpávací elektrárny vzduchu vhání do utěsněných jeskyň nebo opuštěných dolů vzduch pod tlakem. V okamžiku potřeby se stlačený vzduch pod tlakem okolo 6 MPa vpustí do spalovací turbíny spolu s přídavkem plynu, jehož spotřeba se na dosaženém elektrickém výkonu turbosoustrojí podílí jen jednou třetinou.





Obr. 3.4. Principiální schéma systému CAES na stlačování vzduchu [12]

V průmyslovém měřítku byla poprvé uvedena do provozu roku 1974 v německém Hundorfu. Vzduch je čerpán do dvou hlubinných solných jeskyň o objemu 150 000 m<sup>3</sup> a plynová turbína je schopná po dobu tří hodin vracet do sítě výkon 290 MW. Ani další tlakovzdušná plynová „přečerpávačka“ s výkonem 110 MW postavená v Alabamě v USA nevrací z uložené energie víc než 55 % zpět, protože dochází ke ztrátám tepla při stlačování vzduchu.

V plánu je projekt AA-CAES (adiabatic compressed air energy storage), kdy se bude využívat adiabatické teplo vzniklé při stlačování vzduchu do jeskyně k výrobě energie. Na turbínu tedy nepůjde směs stlačeného vzduchu a přídavného plynu, ale směs vzduchu a využitého adiabatického tepla. Účinnost tohoto systému pak stoupne na 75 %. Cena za 1 kW pak vychází na 700 dolarů.

Nevýhodou je, že taková to výstavba závisí nejen na technologických podmínkách, ale také na geologických podmínkách. [1]

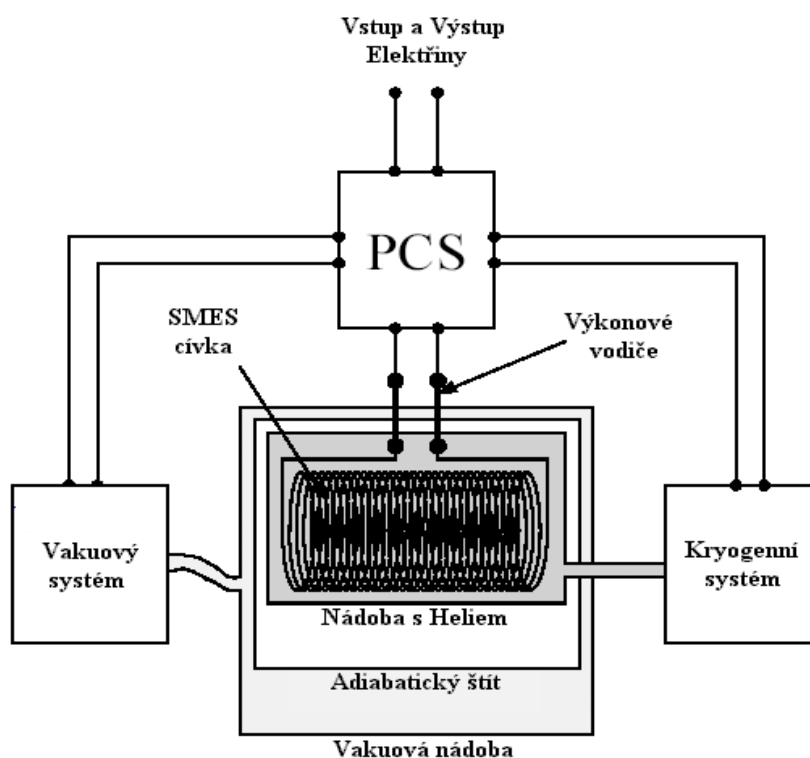
### 3.5. Supravodivý magnetický akumulátor energie

#### Základní principy SMES systémů (superconducting magnetic energy system)

Supravodivý magnetický akumulátor energie (SMES) je jednou z nových voleb pro akumulaci elektrické energie. Zkratka SMES byla vytvořena v 70 letech 20. století na univerzitě ve Wisconsinu. Energie je akumulována v magnetickém poli cívky protékané proudem. Tato cívka je zhotovena ze supravodivého vodiče, takže v ní nedochází k žádným odporovým ztrátám. V zásadě to znamená, že

jde o velmi výkonný způsob akumulace energie. Žádný systém ale není 100% účinný a zde patří k hlavním energetickým ztrátám energie potřebná k chodu chladicí jednotky, která udržuje cívku pod kritickou teplotou supravodiče.

Vstupující a odebíraná elektřina prochází Systémem stavu energie (Power conditioning system - PCS), který je spojen se supravodivou cívku (uvnitř nádoby s héliem) přes výkonové vodiče. Kryogenní okruh se stará o chlazení nezbytné k udržení chladiva (zpravidla tekuté hélium) a tím i supravodivé cívky na požadované teplotě. Podle použití může být oddělen zdroj energie pro obslužné systémy z důvodu prodloužení doby funkčnosti zařízení a tím i doby překlenutí výpadku energie. [10]



Obr. 3.5. Supravodivý magnetický akumulátor [10]

### Kryogenní systém

Efektivita SMES zařízení není typicky dána supravodivou cívku, která je neobyčejně efektivní, ale konstrukční volbu kryogenního systému a výkonových vodičů. U supravodiče se kryogenní systém skládá z kryostatu, který odděluje studenou nádobu s héliem od okolí, a zkapalňovače hélia. Cívka pracuje na 1,8°K v héliu při atmosférickém tlaku.

Tato teplota je vybrána, jelikož je to optimální hodnota pro přestup tepla a tepelnou vodivost supratekutého hélia. Složitost, velikost a cena chladicího systému závisí na velikosti a teplotě chlazeného prostoru. Kryogenní systém může také vytvářet chladivo o několika různých teplotách. Některé systémy používají chladivo na 4,2°K k udržení stálého tlaku v 1,8°K studené lázni a zadržení jakéhokoli tepla vstupujícího do chlazeného systému přes výkonové vodiče. Jiná část může chladit na 77°K (tekutý dusík) potřebných k chlazení výkonových vodičů.

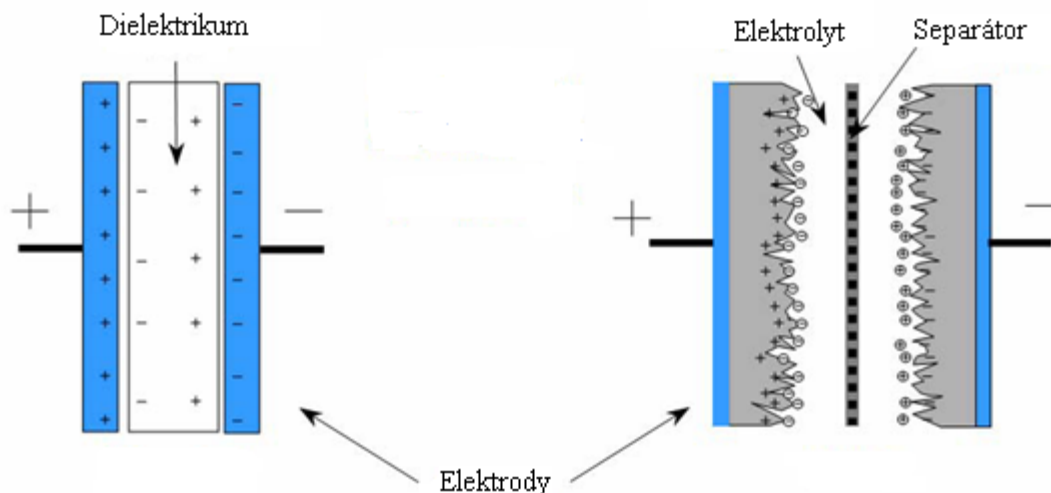
### **Výhody a nevýhody SMES**

- Mezi výhody patří především efektivnost akumulace energie větší jak 95%, krátký čas reakce na výkyvy v připojené síti (milisekundy), krátké časy celkového nabití a vybití (1-2 sekundy), miliony cyklů nabití-vybití a dosahované vysoké proudové hustoty.
- Největší nevýhodou je požadavek na kryogenní systém a problémy s ním spojené. Dále pak menší hustota akumulované energie než například u elektrochemických systémů. [13]

## **3.6. Superkondenzátor**

### **Princip funkce**

Superkapacitor (superkondenzátor) představuje v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií, která umožňuje dosažení obrovské kapacity řádu až stovek či tisíců Faradů. Tato technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě. Energie je v superkapacitoru uložena elektrostaticky, stejně jako u klasického kondenzátoru. Po přivedení vnějšího napětí dochází k přesunu kladných iontů v elektrolytu směrem k záporné elektrodě a k přesunu záporných iontů ke kladné elektrodě.



Obr. 3.6. Struktura kondenzátoru a superkondenzátoru [16]

Jednu z nejdůležitějších komponent superkapacitoru představuje vrstva aktivního uhlíku, která je nanesena na vnitřní stranu hliníkových elektrod, které jsou tvořeny hliníkovou fólií. Aktivní uhlík ve formě prášku je tvořen velmi malými částicemi, které v celém objemu vytvářejí velice pórovitý povrch, jehož plocha je obrovská.

Výrobci uvádí hodnotu až  $2000 \text{ m}^2$  na jeden gram prášku. Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, které ještě podstatně zvyšují povrch částic. Elektrody kondenzátoru jsou odděleny separátorem (polypropylenová fólie) a jsou obklopeny elektrolytem, který je tekutý nebo ve formě gelu.

Tloušťka dielektrika (el. dvouvrstvy) je velmi malá, řádově  $10^{-10} \text{ m}$ . Právě díky kombinaci obrovské plochy a velmi tenké dvouvrstvy se dosahuje velké schopnosti vázat náboj a tedy vysoké kapacity superkondenzátoru při malém sériovém odporu. Určitou nevýhodou, vzhledem k vlastnostem elektrolytu a možnému průrazu elektrické dvouvrstvy, je nízké provozní napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí  $2,3 - 2,7 \text{ V}$  v případě velmi používaného organického elektrolytu. Pro větší napětí je nutné řadit superkondenzátory do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných balančních obvodů.

Tab. 3.1. Porovnání akumulátorů

Parametry	Druh akumulátoru		
	Olověný akumulátor	Superkondenzátor	Elektrolytický kondenzátor
nabíjecí doba	1 až 6 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
vybíjecí doba	0,3 až 3 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
energetická hustota [Wh/kg]	10 až 100	1 až 10	< 0,1
výkonová hustota [W/kg]	< 1 000	< 10 000	< 100 000
počet cyklů	1 000	> 500 000	> 500 000
účinnost	0,7 až 0,85	0,85 až 0,98	> 0,95

Světoví výrobci superkondenzátorů (např. Siemens, Maxwell, Epcos) nabízejí různé typy kapacitorových baterií (modulů). Např. modul od firmy Epcos s kapacitou 220 F / 56 V odpovídá „kapacitě“ 3,3 Ah). Tento modul je složen z 24 superkapacitorů 5000 F / 2,5 V s aktivním srovnáváním napětí. Celková hmotnost modulu je 30 kg, měrná výkonová hustota činí 1,6 kW/kg, měrná energetická hustota 3 Wh/kg, vnitřní odpor 8 mΩ. [9]

### Výhody

- Vysoký měrný výkon v porovnání s akumulátory (jednotky kW/kg).
- Nízký vnitřní odpor (jednotky mΩ).
- Vysoký počet pracovních cyklů (až 1 000 000).
- Vysoká účinnost (až 98 %).
- Vysoká rychlost nabíjení a vybíjení (řádově sekundy).

## Nevýhody

- Nízká měrná energie v porovnání s akumulátory (jednotky Wh/kg) – cca 5x až 10x nižší než u olověných akumulátorů.
- Nízké provozní napětí na článek – nutnost sériového spojení superkapacitorů a použití obvodů pro vyrovnávání napětí.
- Změna napětí v závislosti na úrovni nabití (to je naopak určitá výhoda spočívající ve snadnosti stanovení zbývajících akumulované energie v kapacitoru).
- Poměrně vysoké samovybíjení v porovnání s akumulátory.

## 3.7. Vodíkový systém

Vodíkový systém pro akumulaci elektrické energie pracuje na elektrochemickém principu akumulace. Skládá se ze dvou částí.

- elektrolyzér  
(Při přebytku elektrické energie vyrábí vodík elektrochemickým způsobem a ten se skladuje.)
- palivový článek  
(Naopak při nedostatku elektrické energie se skladovaný vodík využívá jako palivo palivového článku pro výrobu elektrické energie.)

### 3.7.1. Elektrolyzér

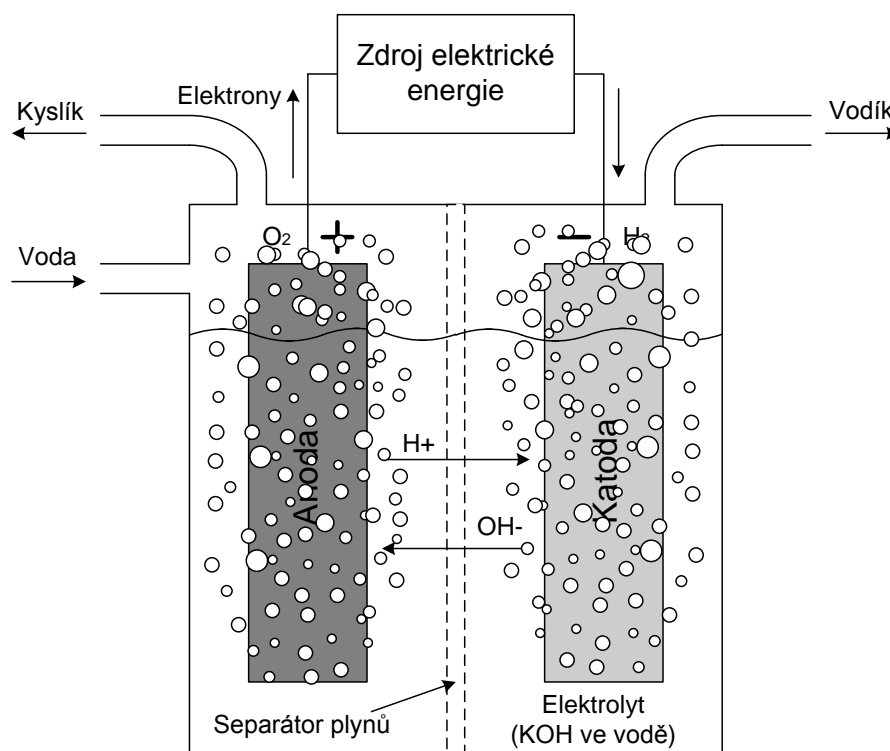
Při elektrolýze je elektrická energie využita k rozkladu vody na jednotlivé elementární prvky a to vodík a kyslík. Elektrolýza je často preferovaná metoda výroby vodíku, neboť jako jediná není založena na potřebě vstupních fosilních paliv. Produkuje vodík vysoké čistoty a je proveditelná jak v malých tak i ve velkých množstvích.

Základním prvkem elektrolyzéru je série článků, přičemž každý z nich je vybaven kladnou a zápornou elektrodou. Elektrody jsou ponořeny do elektricky vodivé vody. Vodivost je dosažena přidáním vodíkových či hydroxylových iontů (hydroxidů), které jsou nejčastěji ve formě alkalického hydroxidu draselného (KOH).

Anoda (kladná elektroda) je obvykle vyrobená z niklu a mědi. Na povrchu je pokryta oxidy kovů, jako je mangan, wolfram či ruthenium. Kovy anody umožňují na jejím povrchu rychlé párování (spojování) atomárního kyslíku do kyslíkových párů (molekul kyslíku).

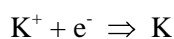
Katoda (záporná elektroda) je obvykle vyrobená z niklu potaženého malým množstvím platiny jako katalyzátoru. Katalyzátor umožňuje rychlé párování atomárního vodíku do vodíkových párů (molekula vodíku) na povrchu elektrody, čímž vzrůstá rychlost produkce vodíku. Bez katalyzátoru by se atomární vodík hromadil na elektrodě a blokoval by průchod elektrického proudu.

Separátor plynu, či membrána, jsou použity pro zabránění vzájemného promísení vodíku a kyslíku při současném umožnění volnému průchodu iontů. Je obvykle vyráběn z materiálů na bázi azbestu majících schopnost ubránit se teplotám vyšším jak 80 °C (176 °F).



Obr. 3.7. Elektrolyzér [9]

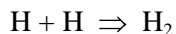
- Reakce probíhající na katodě



kladně nabitý iont draslíku je neutralizován

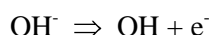


draslíkový atom reaguje s molekulou vody za vzniku kationu draslíku, atomu vodíku a hydroxidového iontu

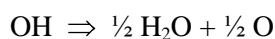


vysoce reaktivní atom vodíku se váže na katodu (kov katody) a v reakci s dalším vázaným atomem vodíku vytváří molekulu vodíku, která následně jako plyn opouští katodu.

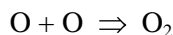
- Reakce probíhající na anodě



záporně nabitý hydroxidový iont (hydroxidový zbytek) je oxidován



molekula OH reaguje za vzniku vody a atomu kyslíku



vysoce reaktivní kyslíkový atom se váže na anodu (kov anody) a v reakci s dalšími vázanými kyslíkovými atomy vytváří molekulu kyslíku, která následně jako plyn opouští anodu. [9]

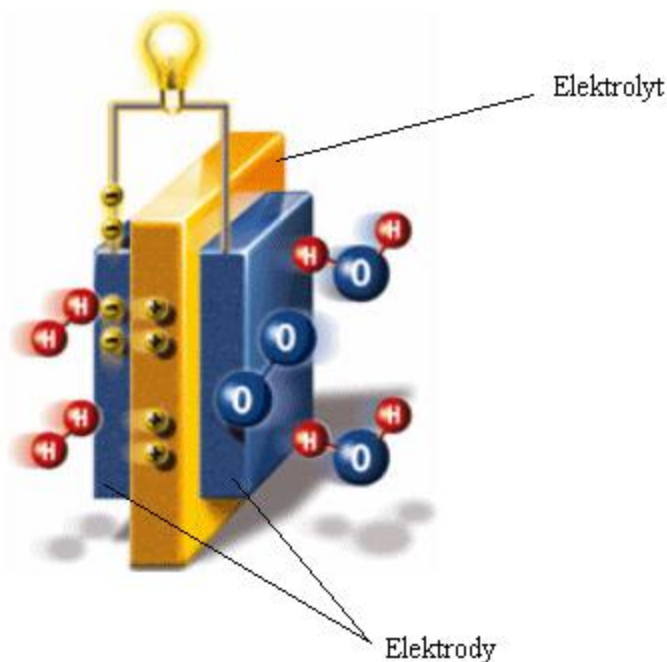
Množství vyráběného vodíku je závislé na proudové hustotě (množství proudu v ampérech na plochu elektrody v  $\text{m}^2$ ;  $\text{A}/\text{m}^2$ ). Obecně platí: čím větší je proudová hustota, tím je potřeba většího zdroje napětí, čímž narůstají energetické náklady na jednotku vodíku. Nicméně, vyšší napětí sníží celkovou velikost elektrolyzéry, což vyústí ve snížení investičních nákladů. Nejmodernější dostupné elektrolyzéry mají energetickou účinnost mezi 65 až 80 % a pracují s proudovými hustotami kolem  $2\,000 \text{ A}/\text{m}^2$  ( $186 \text{ A}/\text{ft}^2$ ). [9]

### 3.7.2. Palivový článek

Palivové články jsou založeny na opačném principu než elektrolyza. Palivový článek se z elektrolytu, elektrod a elektrického okruhu. Elektrolyt musí být iontově vodivý, v našem případě se jedná o proton. Pro elektrický proud musí být dielektrikem, elektrony tedy propouštět nesmí. Vodík je přiváděn k anodě, na které se katalyticky štěpí na protony a elektrony. Protony přechází elektrolytem ke katodě, zatímco uvolněné elektrony přechází vnějším vedením a produkují elektrický proud. Ke katodě je přiváděn kyslík, který zde katalyticky reaguje s prostoupenými protony a elektrony za vzniku vody.



Na obou elektrodách vzniká potenciální rozdíl kolem jednoho voltu, který při zatížení článku poklesne obvykle na hodnoty 0,5 – 0,8 V. Aby bylo dosaženo potřebného vyššího napětí, jsou desítky buněk sériově uspořádány do jednotlivých svazků stavebnicovým způsobem. Jednotlivé svazky mohou být opět libovolně propojovány sériově nebo paralelně podle požadavků na výstupní napětí a proud. [13]



Obr. 3.8. Schéma palivového článku [9]

## 4. Výběr kritérií a jejich váhy pro rozhodování vybraných alternativ

### 4.1. Vybrané alternativy

Pro konečné určení, který ze systémů bude nejvhodnější pro akumulaci elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů je nutné omezit výběr variant na menší počet. Z elektrochemických akumulátorů jsem vybral Olověný akumulátor. Hlavními výhodami je dobře zvládnutá technologie výroby, relativně nízká cena a vysoký výkon – např. pro startování automobilu by se jiné články než olověné použít prakticky nedaly. Vodíkové systémy jsou dnes rychle se vyvíjející technologií a nalézají uplatnění v automobilovém průmyslu. Je jí věnovaná vysoká pozornost při výzkumech a různých prototypch pro uplatňování tohoto systému do praxe. To vše vede k značným změnám parametrů vodíkových systémů. Také cena se v poslední době značně mění a s budoucí rostoucí masivní využitelností ještě klesne.

Jako další vhodnou variantu pro pozdější výpočet jsem vybral systém CAES. Výhodou je dosažení velkých kapacit až 100MW. VRB se jevila také jako výhodná varianta, ale nač budovat tak velké akumulátory, které zabírají obrovskou plochu, když můžeme využít to co už se jednou vybuchovalo (doly, jeskyně). Superkondenzátor jsem vybral z důvodu rychlosti nabíjení, malých rozměrů a přijatelné ceny.

## **4.2. Teorie multikriteriální analýzy**

Teorie multikriteriálního (vícekriteriálního) rozhodování je založena na matematickém modelování, i když pro zvládnutí základů vícekriteriálních optimalizačních technik je možné vystačit s matematikou velmi jednoduchou. Toto použití matematiky za cenu vynaložení jistě námahy na studium, zajišťuje na druhé straně rigorózní přístup k výkladu problematiky optimálního rozhodování v situacích, které svou složitostí jsou náročné. [17]

### **Podstata úloh vícekriteriálního rozhodování**

Rozhodnutím rozumíme vybrání jedné varianty ze seznamu v dané situaci potenciálně realizovatelných variant na základě většího množství kritérií.

Vedle seznamu kritérií nepřímo formulujících cíl rozhodovací analýzy je nutné mít k dispozici i seznam (množinu) variant, z nichž rozhodnutí vybíráme. Případy, kdy je k dispozici jednoznačně definovaný seznam potenciálních variant jsou spíše výjimkou než pravidlem. Tento seznam může být zadán explicitně, jako výčet konečného počtu možností, nebo implicitně specifikací podmínek, které musí rozhodovací varianta splňovat, aby mohla být považována za přípustnou. Ani v této etapě rozhodovacího postupu se zpravidla nelze vyhnout subjektivním vlivům případně i zjišťování mínění expertů či zadavatele úlohy.

Je-li k dispozici seznam kritérií i seznam rozhodovacích variant, je nutné podrobněji uvážit, jakou formu by konečné rozhodnutí mělo mít. Trváme-li na tom, že je skutečně nutné vybrat jedinou optimální variantu určenou k realizaci, měli bychom si připustit, že v typických případech chceme z nespolehlivých a nedostatečných informací vytěžit něco, co v nich téměř jistě není obsaženo. Speciálním případem takto formulované úlohy je požadavek, abychom seřadili rozhodovací varianty podle pořadí v souladu s tím, jak se přibližují k představě varianty optimální. [17]

### **Multikriteriální vyhodnocovací metody**

- Metoda váženého součtu (WSA - Weighted Sum Approach)
- Metoda ideálních bodů (IPA - Ideal Points Analysis)
- Metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)
- Metoda shody a neshody (CDA - Concordance Discordance Analysis)

Tyto metody je možné rozdělit podle výpočetního principu, který metody využívají, například:

- maximalizace užitku,
- minimalizace vzdálenosti od ideální varianty,
- vyhodnocování variant na základě preferenční relace, atd.

Řada metod vícekritériálního hodnocení variant vyžaduje kardinální informaci o relativní důležitosti kritérií, kterou lze vyjádřit pomocí *vektoru vah kritérií*:

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \quad \sum_{i=1}^k v_i = 1, \quad v_i \geq 0.$$

### 4.3. Výběr kritérií

**V<sub>1</sub> - Olověný akumulátor**

**V<sub>2</sub> - Vodíkový systém**

**V<sub>3</sub> - Superkondenzátor**

**V<sub>4</sub> - Systém stlačeného vzduchu (CAES)**

Tab. 4.1 Vybrané kritéria

	kritérium			
	<b>f<sub>1</sub> = min</b>	<b>f<sub>2</sub> = max</b>	<b>f<sub>3</sub> = min</b>	<b>f<sub>4</sub> = min</b>
<b>varianta</b>	<b>účinnost [%]</b>	<b>životnost [roky]</b>	<b>cena [\$/kWh]</b>	<b>startovací čas [s]</b>
V <sub>1</sub>	85	5	240	0,004
V <sub>2</sub>	35	0,2	750	30
V <sub>3</sub>	98	20	270	1
V <sub>4</sub>	70	20	700	60

Při akumulaci elektrické energie dochází ke ztrátám při přeměně a uložení energie, proto jako první kritérium s největší vahou jsem vybral účinnost akumulačního systému. Uvažujeme, že akumulovaná energie z OZE bude vykrývat špičky, proto jsem jako další kritérium vybral startovací čas. OZE mají vcelku dost velkou životnost, tudíž jsem vybral jako další kritérium životnost. A jako poslední kritérium měrný náklad na kWh.

### 4.4. Určení vah kritérií

Jak už jsem uvedl největší důležitost kladu na účinnost systému, díky snaze zmenšit ztráty celého akumulačního systému. Dále pak kladu důraz na životnost systému, od které se pak také odvíjí cena. Měrné náklady na kWh jsou od různých výrobců udávány s velkým rozsahem, proto nekladu velký důraz na toto kritérium. A jako poslední kritérium jsem vybral startovací čas.

#### 4.4.1. Metoda kvantitativního párového srovnání kritérií pro výpočetní metodu TOPSIS

Při vytváření matice párových srovnání  $S=s_{ij}$ , kdy  $i,j=1,2,\dots,k$ , se často používá stupnice  $1,2,\dots,9$  a reciproké hodnoty. Prvky matice  $s_{ij}$  jsou interpretovány jako odhady podílu vah  $i$ -tého a  $j$ -tého kritéria.

$$s_{ij} \approx \frac{v_i}{v_j} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Důvody pro zvolený rozsah stupnice jsou okolnosti, že všechny prvky by měly být stejného řádu, existuje i odpovídající vhodná verbální stupnice:

- 1 - rovnocenná kritéria  $i$  a  $j$
- 3 - slabě preferované kritérium  $i$  před  $j$
- 5 - silně preferované kritérium  $i$  před  $j$
- 7 - velmi silně preferované kritérium  $i$  před  $j$
- 9 - absolutně preferované kritérium  $i$  před  $j$

Hodnoty 2, 4, 6, 8 vyjadřují mezistupně.

Vektor jejich hodnot označíme  $v = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ .

Matice párových porovnání  $S$  obsahuje kvantifikované informace od uživatele o vztahu jednotlivých dvojic prvků. Této matici se říká Saatyho matice. Prvek  $s_{ij}$  této matice můžeme interpretovat v podstatě jako poměr důležitosti prvků  $f_i$  a  $f_j$ . Z tohoto určení tedy vyplývají vlastnosti prvků této matice:

- prvky na diagonále  $s_{ii}=1$  při  $i=1,2,\dots,k$
- matice  $S$  je reciproční matice - platí tedy:  $s_{ij}=1/s_{ji}$
- Matice  $S$  vypadá následovně.

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & \dots & f_k \\ f_1 & 1 & s_{12} & \dots & s_{1k} \\ f_2 & 1/s_{12} & 1 & \dots & s_{2k} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ f_k & 1/s_{1k} & 1/s_{2k} & \dots & 1 \end{matrix}$$

- Matice  $S$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 7 \\ 1/4 & 1 & 3 & 4 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

### Určení vah kritérií z geometrického průměru řádků

Jednoduchý a nenáročný způsob určení vah kritérií ze zadané matice  $S$  spočívá ve výpočtu geometrického průměru každého řádku této matice

$$g_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k s_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

a následné normalizace určených vah, tak aby byla splněna podmínka

$$\sum_{i=1}^k v_i = 1, \quad v_i \geq 0.$$

Normalizovat můžeme například jednoduchým vztahem.

$$v_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \quad i, j = 1, 2, \dots, k$$

- Vypočteme geometrické průměry všech řádků

$$g_1 = \sqrt[4]{1 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} = 3,6$$

$$g_2 = \sqrt[4]{1/4 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4} = 1,31$$

$$g_3 = \sqrt[4]{1/6 \cdot 1/3 \cdot 1 \cdot 2} = 0,5773$$

$$g_4 = \sqrt[4]{1/7 \cdot 1/4 \cdot 1/2 \cdot 1} = 0,3655$$

- Nyní znormalizujeme geometrické průměry řádků a dostáváme váhy jednotlivých kritérií.

$$v_1 = \frac{g_1}{\sum_{i=1}^k g_i} = \frac{3,6}{3,6 + 1,31 + 0,5773 + 0,3655} = 0,615$$

$$v_2 = \frac{g_2}{\sum_{i=1}^k g_i} = \frac{1,31}{3,6 + 1,31 + 0,5773 + 0,3655} = 0,224$$

$$v_3 = \frac{g_3}{\sum_{i=1}^k g_i} = \frac{0,5773}{3,6 + 1,31 + 0,5773 + 0,3655} = 0,099$$

$$v_4 = \frac{g_4}{\sum_{i=1}^k g_i} = \frac{0,3655}{3,6 + 1,31 + 0,5773 + 0,3655} = 0,062$$

- Vektor vah kritérií pak má tvar.

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \quad \sum_{i=1}^k v_i = 1, \quad v_i \geq 0.$$

$$v = (0,615; 0,224; 0,099; 0,062)$$

#### 4.4.2. Metoda párového srovnání kritérií pro výpočetní metodu WSA

Zde se používá pro odhad vah pouze informace, které ze dvou kritérií je při párovém srovnání důležitější. Postupně srovnáme každá dvě kritéria mezi sebou, takže počet srovnání je

$$N = \binom{k}{2} = \frac{k(k-1)}{2}$$

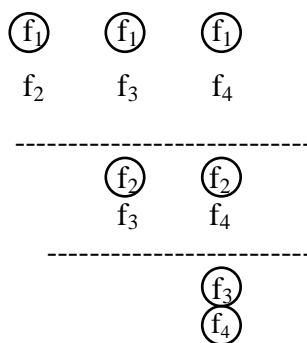
Srovnání se mohou provádět v tzv. **Fullerově trojúhelníku**. Kritéria se pevně očísloví pořadovými čísly  $1, 2, \dots, k$ . Vytvoříme trojúhelníkové schéma, jehož dvojřádky tvoří dvojice pořadových čísel, uspořádaných tak, že se každá dvojice kritérií vyskytne právě jedenkrát. Poté zakroužkováním označíme u každé dvojice to kritérium, které považuje za důležitější. [19]

- obecné schéma Fullerova trojúhelníku

1	1	1	.	1
2	3	4	.	k
-----				
	2	2	.	2
	3	4	.	k
	-----			
	.	.		k
	-----			
		k-2		k-2
		k-1		k
		-----		
				k-1
				k

Výhodou této metody je jednoduchost vyžadované informace. Po úpravách je možno připustit i situace, že některá kritéria jsou stejně důležitá, nebo nesrovnatelná.

- Vytvořil jsem Fullerův trojúhelník a zakroužkoval kritéria s větší vahou



Tab. 4.2. Počet zakroužkování  $i$ -tého kritéria  $n_i$ .

kritérium	počet bodů
$n_1$	3
$n_2$	2
$n_3$	0,5
$n_4$	0,5

- Váha  $i$ -tého kritéria se pak vypočte dle následujícího vzorce :

$$v_i = \frac{n_i}{N} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$N = \binom{k}{2} = \frac{k(k-1)}{2} = \frac{4(4-1)}{2} = 6$$

$$v_1 = \frac{n_1}{N} = \frac{3}{6} = 0,5$$

$$v_2 = \frac{n_2}{N} = \frac{2}{6} = 0,33$$

$$v_3 = \frac{n_3}{N} = \frac{0,5}{6} = 0,08$$

$$v_4 = \frac{n_4}{N} = \frac{0,5}{6} = 0,08$$

- Vektor vah kriterií potom má tvar.

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k)$$

$$\sum_{i=1}^k v_i = 1,$$

$$v_i \geq 0.$$

$$v = (0,5; 0,33; 0,08; 0,08)$$

## 5. Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie získané z OZE

Tab. 5.1. Varianty

	kritérium			
	$f_1 = \min$	$f_2 = \max$	$f_3 = \min$	$f_4 = \min$
varinta	účinnost [%]	životnost [roky]	cena [\$/kWh]	startovací čas [s]
V <sub>1</sub>	85	5	240	0,004
V <sub>2</sub>	35	0,2	750	30
V <sub>3</sub>	98	20	270	1
V <sub>4</sub>	70	20	700	60

V<sub>1</sub> - Olověný akumulátor

V<sub>3</sub> - Superkondenzátor

V<sub>2</sub> - Vodíkový systém

V<sub>4</sub> - Systém stlačeného vzduchu (CAES)



### 5.1. Výběr optimální varianty pomocí multikriteriální metody TOPSIS

Kriteriální hodnoty pro jednotlivé varianty jsou uspořádány v kriteriální matici  $Y=(y_{ij})$ , kde  $y_{ij}$  je hodnota  $i$ -té varianty hodnocené podle  $j$ -tého kritéria.

$$Y = \begin{bmatrix} 85 & 5 & 240 & 0,004 \\ 35 & 0,2 & 750 & 30 \\ 98 & 20 & 270 & 1 \\ 70 & 20 & 700 & 60 \end{bmatrix}$$

- Provedl jsem úpravu kriteriální matice na tvar, kdy všechna kritéria budou maximalizační (max).
- Pro minimalizační kritéria jsem určil nejhorší hodnoty:  $f_4$ - 60,  $f_3$ - 750.  
Od těchto hodnot odečtu kriteriální hodnoty dané varianty a převedu tak všechna minimalizační kritéria na maximalizační.

$$y_{14}^* = 60 - y_{14} = 59,996$$

$$y_{24}^* = 60 - y_{24} = 30$$

$$y_{34}^* = 60 - y_{34} = 59$$

$$y_{44}^* = 60 - y_{44} = 0$$

$$y_{13}^* = 750 - y_{13} = 510$$

$$y_{23}^* = 750 - y_{23} = 0$$

$$y_{33}^* = 750 - y_{33} = 480$$

$$y_{43}^* = 750 - y_{43} = 50$$

- Získal jsem tak matici ve tvaru :

$$Y^* = \begin{bmatrix} 85 & 5 & 510 & 59,996 \\ 35 & 0,2 & 0 & 30 \\ 98 & 20 & 480 & 59 \\ 70 & 20 & 50 & 0 \end{bmatrix}$$

Dále se konstruuje normalizovaná kritériální matice  $R=(r_{ij})$ , kde pro výpočet normalizovaných hodnot je navržen vzorec

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} \quad \text{kde:} \quad i=1,2,\dots,p, \quad j=1,2,\dots,k.$$

výpočet jednotlivých členů matice R

$$r_{11} = \frac{y_{11}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{85}{\sqrt{85^2 + 35^2 + 98^2 + 70^2}} = 0,56$$

$$r_{12} = \frac{y_{12}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{5}{\sqrt{5^2 + 0,2^2 + 20^2 + 20^2}} = 0,17$$

$$r_{13} = \frac{y_{13}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{510}{\sqrt{510^2 + 0^2 + 480^2 + 50^2}} = 0,73$$

$$r_{14} = \frac{y_{14}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{59,996}{\sqrt{59,996^2 + 30^2 + 59^2 + 0^2}} = 0,67$$

$$r_{21} = \frac{y_{21}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{35}{\sqrt{35^2 + 85^2 + 98^2 + 70^2}} = 0,23$$

$$r_{22} = \frac{y_{22}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{0,2^2 + 5^2 + 20^2 + 20^2}} = 0,01$$

$$r_{23} = \frac{y_{23}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{0}{\sqrt{0^2 + 510^2 + 480^2 + 50^2}} = 0$$

$$r_{24} = \frac{y_{24}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{30}{\sqrt{30^2 + 59,996^2 + 59^2 + 0^2}} = 0,34$$

$$r_{31} = \frac{y_{31}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{98}{\sqrt{98^2 + 85^2 + 35^2 + 70^2}} = 0,65$$

$$r_{32} = \frac{y_{32}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{20}{\sqrt{20^2 + 5^2 + 0,2^2 + 20^2}} = 0,69$$

$$r_{33} = \frac{y_{33}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{480}{\sqrt{480^2 + 510^2 + 50^2 + 0^2}} = 0,68$$

$$r_{34} = \frac{y_{34}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{59}{\sqrt{59^2 + 59,996^2 + 30^2 + 0^2}} = 0,66$$

$$r_{41} = \frac{y_{41}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{70}{\sqrt{85^2 + 35^2 + 98^2 + 70^2}} = 0,46$$

$$r_{42} = \frac{y_{42}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{20}{\sqrt{20^2 + 5^2 + 0,2^2 + 20^2}} = 0,69$$

$$r_{43} = \frac{y_{43}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{50}{\sqrt{50^2 + 510^2 + 0^2 + 480^2}} = 0,07$$

$$r_{44} = \frac{y_{44}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} = \frac{0}{\sqrt{0^2 + 59,996^2 + 30^2 + 59^2}} = 0$$

- normalizovaná kritériální matice  $R$  má teda tvar  $= (r_{ij})$  :

$$R = \begin{bmatrix} 0,56 & 0,17 & 0,73 & 0,67 \\ 0,23 & 0,01 & 0 & 0,34 \\ 0,65 & 0,69 & 0,68 & 0,66 \\ 0,46 & 0,69 & 0,07 & 0 \end{bmatrix}$$

- Následně vypočtu váženou kritériální matici  $W$  tak, že každý  $j$ -tý sloupec normalizované kritériální matice  $R$  násobíme odpovídající vahou  $v_j$ :

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \dots & w_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 r_{11} & v_2 r_{12} & \dots & v_k r_{1k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_1 r_{p1} & v_2 r_{p2} & \dots & v_k r_{pk} \end{bmatrix}$$

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \quad \sum_{i=1}^k v_i = 1, \quad v_i \geq 0.$$

$$v = (0,615; 0,224; 0,099; 0,062) \text{ viz. kapitola 4.4.1.}$$

- Výpočet jednotlivých prvků vážené kritériální matice  $W$

$$w_{11} = r_{11} \cdot v_1 = 0,56 \cdot 0,615 = 0,34$$

$$w_{21} = r_{21} \cdot v_1 = 0,23 \cdot 0,615 = 0,14$$

$$w_{12} = r_{12} \cdot v_2 = 0,17 \cdot 0,224 = 0,04$$

$$w_{22} = r_{22} \cdot v_2 = 0,01 \cdot 0,224 = 0,01$$

$$w_{13} = r_{13} \cdot v_3 = 0,73 \cdot 0,099 = 0,07$$

$$w_{23} = r_{23} \cdot v_3 = 0 \cdot 0,099 = 0$$

$$w_{14} = r_{14} \cdot v_4 = 0,67 \cdot 0,062 = 0,04$$

$$w_{24} = r_{24} \cdot v_4 = 0,34 \cdot 0,062 = 0,02$$

$$w_{31} = r_{31} \cdot v_1 = 0,65 \cdot 0,615 = 0,4$$

$$w_{41} = r_{41} \cdot v_1 = 0,46 \cdot 0,615 = 0,29$$

$$w_{32} = r_{32} \cdot v_2 = 0,69 \cdot 0,224 = 0,15$$

$$w_{42} = r_{42} \cdot v_2 = 0,69 \cdot 0,224 = 0,15$$

$$w_{33} = r_{33} \cdot v_3 = 0,68 \cdot 0,099 = 0,07$$

$$w_{43} = r_{43} \cdot v_3 = 0,07 \cdot 0,099 = 0,01$$

$$w_{34} = r_{34} \cdot v_4 = 0,66 \cdot 0,062 = 0,04$$

$$w_{44} = r_{44} \cdot v_4 = 0 \cdot 0,062 = 0$$

- Vážená kritériální matice  $W$ .

$$W = \begin{bmatrix} 0,34 & 0,04 & 0,07 & 0,04 \\ 0,14 & 0,01 & 0 & 0,02 \\ 0,4 & 0,15 & 0,07 & 0,04 \\ 0,29 & 0,15 & 0,01 & 0 \end{bmatrix}$$

- Nyní zbývá určit ideální variantu  $(H_1, H_2, \dots, H_k)$  a bazální variantu  $(D_1, D_2, \dots, D_k)$  vzhledem k hodnotám ve vážené kritériální matici,

$$\begin{aligned} \text{kde:} \quad H_j &= \max_i(w_{ij}), \quad i=1,2,\dots,k, \\ D_j &= \min_i(w_{ij}), \quad j=1,2,\dots,k, \end{aligned}$$

$$H = (0,34 ; 0,15 ; 0,07 ; 0,04)$$

$$D = (0,14 ; 0,01 ; 0 ; 0)$$

- Další krok spočívá ve výpočtu vzdáleností variant od ideální varianty

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - H_j)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$d_1^+ = \sqrt{0,0121} = 0,11$$

$$d_2^+ = \sqrt{0,04 + 0,0196 + 0,0049 + 0,0004} = 0,255$$

$$d_3^+ = \sqrt{0,0036} = 0,06$$

$$d_4^+ = \sqrt{0,0025 + 0,0036 + 0,0016} = 0,088$$

- vzdálenost variant od bazální varianty

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - D_j)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$d_1^- = \sqrt{0,04 + 0,0009 + 0,0049 + 0,0016} = 0,218$$

$$d_2^- = \sqrt{0,0004} = 0,02$$

$$d_3^- = \sqrt{0,0676 + 0,0196 + 0,0049 + 0,0016} = 0,306$$

$$d_4^- = \sqrt{0,0225 + 0,0196 + 0,0001} = 0,205$$

V obou případech je použita Euklidova míra vzdálenosti.

- Výpočet relativního ukazatele vzdáleností variant od bazální varianty.

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}$$

$$c_1 = \frac{d_1^-}{d_1^+ + d_1^-} = \frac{0,218}{0,11 + 0,218} = 0,665$$

$$c_2 = \frac{d_2^-}{d_2^+ + d_2^-} = \frac{0,02}{0,255 + 0,02} = 0,073$$

$$c_3 = \frac{d_3^-}{d_3^+ + d_3^-} = \frac{0,306}{0,06 + 0,306} = 0,836$$

$$c_4 = \frac{d_4^-}{d_4^+ + d_4^-} = \frac{0,205}{0,088 + 0,205} = 0,751$$

Tab. 5.2. Výsledek multikriteriální metody TOPSIS

Varianta	$d_i^+$	$d_i^-$	$c_i$
V <sub>3</sub> (Superkondenzátor)	0,06	0,218	0,836
V <sub>4</sub> (CAES)	0,088	0,205	0,751
V <sub>1</sub> (Olověný akumulátor)	0,11	0,218	0,665
V <sub>2</sub> (Vodíkový systém)	0,255	0,02	0,073

## 5.2. Výběr optimální varianty pomocí multikriteriální metody WSA

Metoda váženého součtu vychází z principu maximalizace užitku. Dopouští se však zjednodušení v tom, že předpokládá pouze lineární funkci užitku.

Tab. 5.3. Varianty

	kritérium			
	$f_1 = \min$	$f_2 = \max$	$f_3 = \min$	$f_4 = \min$
varinta	účinnost [%]	životnost [roky]	cena [\$/kWh]	startovací čas [s]
$V_1$	85	5	240	0,004
$V_2$	35	0,2	750	30
$V_3$	98	20	270	1
$V_4$	70	20	700	60

Kriteriální matice  $Y=(y_{ij})$ , kde  $y_{ij}$  je hodnota  $i$ -té varianty hodnocené podle  $j$ -tého kritéria.

$$Y = \begin{bmatrix} 85 & 5 & 240 & 0,004 \\ 35 & 0,2 & 750 & 30 \\ 98 & 20 & 270 & 1 \\ 70 & 20 & 700 & 60 \end{bmatrix}$$

Provedeme úpravu kriteriální matice na tvar, kdy všechna kritéria budou maximalizační (max).

Pro minimalizační kritéria určíme nejhorší hodnoty:  $f_4$ - 60 ,  $f_3$ - 750. Od těchto hodnot odečteme kriteriální hodnoty dané varianty a převedeme tak všechna minimalizační kritéria na maximalizační.

$$y_{14}^* = 60 - y_{14} = 59,996$$

$$y_{24}^* = 60 - y_{24} = 30$$

$$y_{34}^* = 60 - y_{34} = 59$$

$$y_{44}^* = 60 - y_{44} = 0$$

$$y_{13}^* = 750 - y_{13} = 510$$

$$y_{23}^* = 750 - y_{23} = 0$$

$$y_{33}^* = 750 - y_{33} = 480$$

$$y_{43}^* = 750 - y_{43} = 50$$

- Matice pak má tvar.

$$Y^* = \begin{bmatrix} 85 & 5 & 510 & 59,996 \\ 35 & 0,2 & 0 & 30 \\ 98 & 20 & 480 & 59 \\ 70 & 20 & 50 & 0 \end{bmatrix}$$

- Nyní jsem určil  $H_j$  a  $D_j$ , kdy  $D_j$  odpovídá minimální hodnota kritéria ve sloupci  $j$  a  $H_j$  odpovídá maximální hodnota kritéria ve sloupci  $j$ .

$$H = (98 ; 20 ; 510 ; 59,996)$$

$$D = (35 ; 0,2 ; 0 ; 0)$$

- Vytvořil jsem normalizovanou kritériální matici  $R=(r_{ij})$ , jejíž prvky jsem získal z kritériální matice  $Y=(y_{ij})$ , pomocí transformačního vzorce.

$$r_{ij} = \frac{Y_{ij} - D_j}{H_j - D_j}$$

- Tato matice již představuje matici hodnot užitku z  $i$ -té varianty podle  $j$ -tého kritéria. lineárně transformujeme kritériální hodnoty tak, že  $r_{ij} \in \langle 0,1 \rangle$ ,  $D_j$  odpovídá minimální hodnota kritéria ve sloupci  $j$  a  $H_j$  odpovídá maximální hodnota kritéria ve sloupci  $j$ .

$$r_{11} = \frac{Y_{11} - D_1}{H_1 - D_1} = \frac{85 - 35}{98 - 35} = 0,79$$

$$r_{12} = \frac{Y_{12} - D_2}{H_2 - D_2} = \frac{5 - 0,2}{20 - 0,2} = 0,24$$

$$r_{13} = \frac{Y_{13} - D_3}{H_3 - D_3} = \frac{510 - 0}{510 - 0} = 1$$

$$r_{14} = \frac{Y_{14} - D_4}{H_4 - D_4} = \frac{59,996 - 0}{59,996 - 0} = 1$$

$$r_{21} = \frac{Y_{21} - D_1}{H_1 - D_1} = \frac{35 - 35}{98 - 35} = 0$$

$$r_{22} = \frac{Y_{22} - D_2}{H_2 - D_2} = \frac{0,2 - 0,2}{20 - 0,2} = 0$$



$$r_{23} = \frac{Y_{23} - D_3}{H_3 - D_3} = \frac{0 - 0}{510 - 0} = 0$$

$$r_{24} = \frac{Y_{24} - D_4}{H_4 - D_4} = \frac{30 - 0}{59,996 - 0} = 0,5$$

$$r_{31} = \frac{Y_{31} - D_1}{H_1 - D_1} = \frac{98 - 35}{98 - 35} = 1$$

$$r_{32} = \frac{Y_{32} - D_2}{H_2 - D_2} = \frac{20 - 0,2}{20 - 0,2} = 1$$

$$r_{33} = \frac{Y_{33} - D_3}{H_3 - D_3} = \frac{480 - 0}{510 - 0} = 0,94$$

$$r_{34} = \frac{Y_{34} - D_4}{H_4 - D_4} = \frac{59 - 0}{59,996 - 0} = 0,98$$

$$r_{41} = \frac{Y_{41} - D_1}{H_1 - D_1} = \frac{70 - 35}{98 - 35} = 0,56$$

$$r_{42} = \frac{Y_{42} - D_2}{H_2 - D_2} = \frac{20 - 0,2}{20 - 0,2} = 1$$

$$r_{43} = \frac{Y_{43} - D_3}{H_3 - D_3} = \frac{50 - 0}{510 - 0} = 0,1$$

$$r_{44} = \frac{Y_{44} - D_4}{H_4 - D_4} = \frac{0 - 0}{59,996 - 0} = 0$$

- Matice R.

$$R = \begin{bmatrix} 0,79 & 0,24 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 1 & 1 & 0,94 & 0,98 \\ 0,56 & 1 & 0,1 & 0 \end{bmatrix}$$

Při použití aditivního tvaru vícekritériální funkce užitku je pak užitek varianty  $a_i$  roven.

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{ij}$$

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \quad \sum_{i=1}^k v_i = 1, \quad v_i \geq 0.$$

$v = (0,5; 0,33; 0,08; 0,08)$  viz. kapitola 4.4.2.

- Výpočet užitku jednotlivých variant

$$u_{\mathbf{C}_1} = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{1j} = \sum 0,79 \cdot 0,5 + 0,24 \cdot 0,33 + 1 \cdot 0,08 + 1 \cdot 0,08 = 0,634$$

$$u_{\mathbf{C}_2} = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{2j} = \sum 0 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,33 + 0 \cdot 0,08 + 0,5 \cdot 0,08 = 0,04$$

$$u_{\mathbf{C}_3} = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{3j} = \sum 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,33 + 0,94 \cdot 0,08 + 0,98 \cdot 0,08 = 0,984$$

$$u_{\mathbf{C}_4} = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{4j} = \sum 0,56 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,33 + 0,1 \cdot 0,08 + 0 \cdot 0,08 = 0,618$$

Tab. 5.4. Výsledek multikriteriální metody WSA

Varianta	$u(a_i)$
$V_3$ (Superkondenzátor)	0,984
$V_1$ (Olověný akumulátor)	0,634
$V_4$ (CAES)	0,618
$V_2$ (Vodíkový systém)	0,04

## 6. Technicko - ekonomický rozbor vybrané varianty s možností kombinace OZE pro akumulaci

Pro určení nejoptimálnější varianty jsem použil dvě výpočtové metody za účelem porovnání jednotlivých výsledků. Pokud počítáme s multikriteriálními metodami, používá se stejná metoda pro určení vah jednotlivých kritérií. Použil jsem dvě výpočetní metody, protože jsem chtěl poukázat jak může ovlivnit výpočet zvolená metoda výpočtu. Výsledky se nepatrně liší. Metody se liší jednak způsobem výpočtu, ale i zvolenou metodou porovnání vah jednotlivých kritérií.

Superkondenzátor dominuje svými parametry a jako dominantní varianta se ukázala jako nejvýhodnější. Olověné akumulátory postoupili o jedno pořadí před systém CAES. Je to důkladný případ jak lze ovlivnit výsledek. Proto se uživatel velmi podíli na předběžném výsledku následného výpočtu. Rozhodl jsem se výsledky zprůměrovat, abych dostal co nejobektivnější výsledek.

- Výpočet průměru z dvou metod výpočtu.

$$p_3 = \frac{0,836+0,984}{2} = 0,91$$

$$p_4 = \frac{0,751+0,618}{2} = 0,68$$

$$p_1 = \frac{0,665+0,634}{2} = 0,65$$

$$p_2 = \frac{0,073+0,04}{2} = 0,06$$

Tab. 6.1. Konečný výsledek multikriteriální analýzy

Varianta	Multikriteriální metoda		Průměr p
	TOPSIS	WSA	
V <sub>3</sub> (Superkondenzátor)	0,836	0,984	0,91
V <sub>4</sub> (CAES)	0,751	0,618	0,68
V <sub>1</sub> (Olověný akumulátor)	0,665	0,634	0,65
V <sub>2</sub> (Vodíkový systém)	0,073	0,04	0,06

Jako nejlepší akumulační prvek se jednoznačně jeví superkondenzátor. Dominuje hlavně největší účinností a také životností. U obou z vypočtených metod s velkým odstupem zvítězil a po následném zprůměrování dosáhl hodnoty 0,91. Systém CAES vyšel jako druhá nejvýhodnější varianta. Nevýhodou je pomalý startovací čas. Navzdory malé pořizovací ceně se jako třetí nejvýhodnější metoda jeví Olověný akumulátor. Jako nejhorší variantou se ukázal vodíkový systém. Má špatnou účinnost a vysoké investiční náklady. Také životnost těchto systémů je krátká a s vysokými investičními náklady značně znevýhodňuje tento porovnávaný systém. Naproti všem těmto negativům je nutné si uvědomit, že vodíkové systémy jsou dnes rychle se vyvíjející technologií a nalézají uplatnění v automobilovém průmyslu. Je jí věnovaná vysoká pozornost při výzkumech a různých prototypch pro uplatňování tohoto systému do praxe. To vše vede k značným změnám parametrů vodíkových systémů. Také cena se v poslední době značně mění a s budoucí rostoucí masivní využitelností ještě klesne.

## Závěr

Je nutné si uvědomit jak bude akumulovaná energie získaná z obnovitelných zdrojů využita. Zda bude akumulovaná energie použita jako záložní zdroj energie ( dodávka energie po dobu řádově hodin ) nebo bude vyplňovat po dobu špiček případné mezery ( řádově minuty). Z pohledu využití akumulované energie jako záložního zdroje je nutné uvědomit si, že Superkondenzátor je vhodný pro vykrytí špiček, ale není schopen dodávat velké výkony po dobu řádově hodin. Proto jsem navrhl možnost kombinace dvou variant.

Pro dodávku energie jako záložního výkonu jsem navrhnul kombinaci Superkondenzátoru a systému CAES. Superkondenzátor s přehledem vykryje dobu nájezdu systém CAES, který následně je schopen dodávat velkou energii do sítě po dobu několika hodin. Pro akumulaci z VTE není až tak výhodný systém CAES, protože si musíme uvědomit, že závisí na geologických podmínkách. Využívá starých dolů pro akumulaci energie. Doly jsou většinou budovány v údolích a VTE se budují na nadmořské výšce od 750 m. Prostor musí být otevřený ať je využití větru co největší. Z čehož vyplývá, že CAES bude ve větší vzdálenosti od VTE a bylo by nutné vést energii na větší vzdálenost, což nám zvyšuje ztráty, které už jsou tak velké vlivem akumulace. Tudíž pro akumulaci energie z VTE je výhodnější použití kombinace Superkondenzátoru a Olověného akumulátoru.

Pro vyplnění špiček je jako nejvýhodnější způsob akumulace dříve zmíněná kombinace Superkondenzátoru a Olověného akumulátoru. Oba systémy mají výborný startovací čas, takže při vybití jednoho ze systému lze okamžitě vyplnit vzniklé špičky druhým systémem.

K vyhodnocení výsledku jsem použil dvou metod, kdy jsem zjistil, že velmi záleží na zvolené multikriterální metodě pro výpočet. Tedy subjektivní pohled na problematiku je u každého uživatele jiný. Já jsem použil metody TOPSIS a WSA a následný výsledek obou metod jsem zprůměroval. Jako jednoznačně nejlepší variantou je Superkondenzátor, ale musel jsem uvažovat také z technického hlediska a proto jsem volil kombinaci dvou variant.

- Pro FVE Superkondenzátor + CAES
- Pro VTE Superkondenzátor + Olověný akumulátor

## Literatura

- [1] [http://www.electricitystorage.org/tech/technologies\\_technologies\\_caes.htm](http://www.electricitystorage.org/tech/technologies_technologies_caes.htm)
- [2] M Skyllas-Kazacos : *Status of the UNSW Vanadium Redox Battery Development*
- [3] <http://www.setrnebudovy.cz/component/content/article/37>
- [4] <http://www.tretpol.cz/470-jak-ulozit-energii>
- [5] Hugues J. : *Wood-fuelled cogeneration, technologies and trends worldwide*
- [6] European commission : *European bioenergy projects*
- [7] <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/brozura-fin.doc>
- [8] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Akumul%C3%A1tor>
- [9] <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-01-18.0217838145>
- [10] <http://www.azom.com/details.asp?articleID=1123>
- [11] [www.hydrogen.org](http://www.hydrogen.org)
- [12] [www.treehugger.com/compressed-air-energy-storage](http://www.treehugger.com/compressed-air-energy-storage)
- [13] <http://www.zdrojeenergie.blogspot.com>
- [14] <http://hubpages.com/hub/Alternative-Energy-Storage-Systems>
- [15] Darrelmann H.: *Comparison of alternative short time storage systems.*
- [16] <http://www.mpoweruk.com/alternatives.htm>
- [17] Hradílek Z. : *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Kniha Montanex, 2009*
- [18] *Sborník Mezinárodní vědecké konference EPE 2009 Dlouhé stráně*
- [19] *Sborník IASTED 2009 Peking*
- [20] *Sborník Wofex 2008/2009*
- [21] *Sborník ELNET 2008*
- [22] České sdružení regulovaných elektroenergetických společností : *Studie OZE Brno*